
La Planta de Generación de Energía Eléctrica PBMR

Gabriela Pérez Soria e Israel Santacruz Isunza
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad Universitaria
gabriela_perez@engineer.com; israelsais@hotmail.com

Cecilia Martín del Campo Márquez
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad Universitaria
ceciliam@premia.imta.mx

Resumen

Este trabajo tiene como finalidad difundir de forma general la tecnología del Reactor Modular de Cama de Esferas. Debido a que nuestro país está en vías de desarrollo, la demanda de energía eléctrica va en aumento con lo cual se presenta el gran reto de satisfacer dicha necesidad, no sólo ocupándose del hecho per se, sino también involucrando el aspecto ambiental y de seguridad. Ambos factores son cubiertos por la tecnología PBMR, la cual abordamos en sus aspectos más básicos con el propósito de que la opinión pública la conozca y se familiarice con este tipo de reactores que bien podrían representar una solución para nuestra creciente demanda de electricidad. Trataremos este reactor visualizándolo como parte de una planta de generación definiendo en primer lugar al reactor en sí. Veremos pues que el sistema PBMR consiste de 2 secciones principales: el reactor y la unidad de conversión de energía, destacando que el principio de operación del reactor PBMR se basa en el ciclo termodinámico Brayton enfriado por helio y que, a su vez, transmite la energía en forma de calor hacia una turbina de gas. En lo que respecta al combustible, se describe su peculiar diseño debido a su geometría esférica, aspecto que hace a este reactor diferente de los tradicionales que utilizan barras de combustible. Precisamente en las esferas de combustible del PBMR es donde radica gran parte de su seguridad inherente ya que cada partícula de combustible, consistente en dióxido de uranio, está forrada con carbón y carburo de silicio los cuales forman una barrera impenetrable conteniendo al combustible y a los productos radiactivos que resulten de las reacciones nucleares. Dichas partículas son encapsuladas en grafito para formar la esfera o "pebble", de aquí nace el nombre de esta innovadora tecnología.

1. INTRODUCCIÓN

México, un país aún en desarrollo y con grandes retos nacionales por delante, debe tener, como una de sus principales prioridades, el replanteamiento de su política energética de tal manera que se asegure el abasto energético a todos los sectores de consumo.

De forma paralela a la necesidad de contar con un sector energético fuerte, está la necesidad de un sector energético limpio. Dicha necesidad quedó de manifiesto hace poco más de una década en la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático, donde quedó establecida la urgencia de encontrar fuentes de energía no emisoras de gases de efecto invernadero (GEI's) los cuales han acelerado el sobrecalentamiento del planeta en las últimas décadas.

Debido a esto, se ha incrementado el interés, por parte de las empresas generadoras de energía eléctrica, en las posibles unidades de generación nuclear con las características de menor tamaño, gran simplicidad de operación y mayor seguridad.

Actualmente el 75.4% de la energía eléctrica generada en México tiene su sustento en la utilización de combustibles fósiles, cifra que permite ver la enorme dependencia de dichos combustibles para satisfacer la demanda de energía eléctrica, sin mencionar la gran cantidad de GEI's que son expulsados a la atmósfera en este proceso. Sólo el 4% de la energía eléctrica es generada por centrales nucleares las cuales no emiten GEI's. [1]

En los últimos años, la comunidad científica internacional ha vuelto su mirada hacia una nueva generación de reactores nucleares para la generación de energía eléctrica, cuyas características de seguridad y viabilidad económica podrían hacer de este tipo de tecnología una opción real para la generación de electricidad en México. Entre estas tecnologías se encuentra el Reactor Modular de Cama de Esferas o Pebble Bed Modular Reactor (PBMR).

Este interés está motivado por la caída en la tasa de generación de energía eléctrica en todo el mundo y por la aceptación de que las pequeñas unidades de generación nuclear son potencialmente más económicas y sencillas en cuanto a su construcción y operación.

2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS DEL PBMR

En los años cincuenta, el Dr. Rudolf Schulten, científico alemán (después conocido como "padre" del PBMR) tuvo la idea de compactar gránulos de uranio, cubiertos individualmente por una capa de carburo de silicio, en esferas de grafito para ser usadas como combustible para un nuevo tipo de reactor de alta temperatura enfriado por helio. Esta idea se concretó con la construcción del reactor AVR, un reactor de prueba de 15 MWe, construido en Alemania (Figura 1) y que operó exitosamente por 21 años.

Posteriormente, a raíz del sentimiento anti-nuclear provocado por el accidente en Chernobyl en el año 1986, y que particularmente afectó a Alemania, la idea fue abandonada. Actualmente, esta tecnología ha sido retomada por científicos en Sudáfrica, y algunas universidades norteamericanas.



Figura 1. Reactor AVR durante su operación, Jülich, Alemania

3. ¿QUÉ ES EL PEBBLE BED MODULAR REACTOR?

Se puede, de alguna manera, resumir las características del Reactor Modular de Cama de Esferas, en las siguientes palabras: es una planta de generación nuclear pequeña, segura, limpia, eficiente, barata y adaptable.

El PBMR es un reactor nuclear que utiliza partículas de uranio compactadas y encapsuladas en grafito para formar una esfera de combustible (aproximadamente 60 mm de diámetro). Además, el diseño hace uso de helio como refrigerante y como medio de transmisión de calor hacia una turbina de ciclo de gas cerrado. Este diseño difiere en gran medida de los reactores comerciales BWR, PWR y CANDU; lo cual hace del PBMR una planta de generación inherentemente segura y económica.

4. PRINCIPIO DE OPERACIÓN DEL PBMR

El sistema principal de energía del PBMR consiste de 2 secciones centrales: el reactor, donde la energía térmica es generada por una reacción nuclear y se emplea grafito como moderador y helio como refrigerante; y la unidad de conversión de energía, donde la energía térmica es convertida en trabajo mecánico y después en energía eléctrica por medio de un ciclo termodinámico de gas directo Brayton para transferir el calor generado en el núcleo del reactor, y convertirlo en energía eléctrica por medio de un turbogenerador de gas.

4.1 Operación del Reactor

El PBMR es un reactor de alta temperatura (HTR) enfriado por helio, el cual consiste de una vasija de presión vertical de acero de 6 m de diámetro y 20 m de altura. Dicho receptáculo está forrado con una capa de ladrillos de grafito. Esta capa de grafito sirve

como un reflector para los neutrones generados por la reacción nuclear y un medio pasivo de transferencia de calor. El revestimiento de ladrillos de grafito está perforado con agujeros verticales para alojar los elementos de control. El reflector de grafito encierra al núcleo. El núcleo es la región del reactor en donde la reacción nuclear tiene lugar. El núcleo del PBMR mide 3.7 m de diámetro y 9 m de altura y consta de 2 zonas: la zona interna, constituida por una columna fija de grafito y la zona externa o anular, que contiene aproximadamente 456,000 esferas de combustible y es donde la reacción nuclear ocurre. El helio fluye a través de la cama de esferas y remueve el calor generado por la reacción nuclear. Este helio es el mismo gas usado como fluido de trabajo en la unidad de conversión de energía, de aquí el ciclo directo de gas del PBMR.[2]

4.2 Operación de la Unidad de Conversión de Energía

En el análisis de los ciclos de turbinas de gas conviene empezar por usar un ciclo con aire normal. Un ciclo de turbinas de gas con aire normal y de compresión y expansión isentrópicas se llama Ciclo Brayton. En él se tiene que sustituir el proceso real de la combustión por un proceso de suministro de calor. En el ciclo Brayton se supone que los procesos de suministro y extracción de calor ocurren a presión constante.

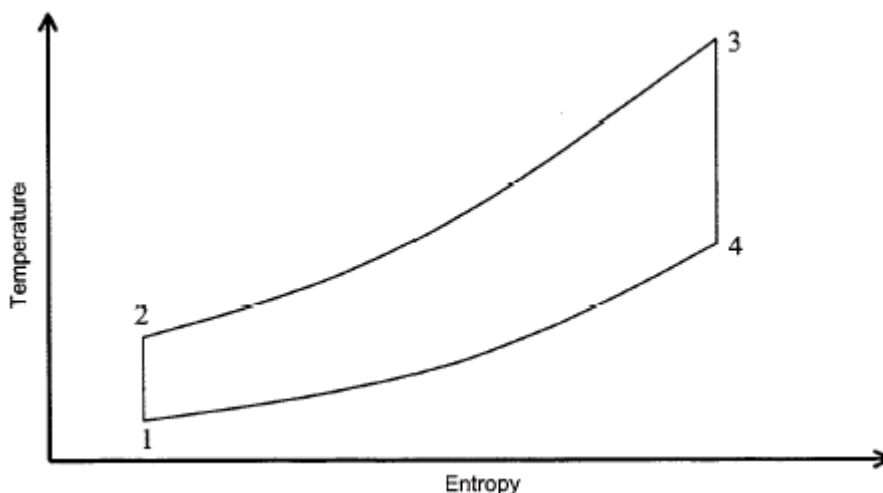


Figura 2. El ciclo Brayton ideal

El ciclo ideal Brayton consiste en dos procesos isentrópicos y dos isobáricos como se muestra en la Figura 2. En (1), el gas a baja presión y temperatura es comprimido en un proceso isentrópico hacia una presión y temperatura más altas (2). De (2) a (3), el gas es calentado en un proceso isobárico (a presión constante) hacia el ciclo máximo de temperatura. De (3) a (4), el gas a alta presión y caliente es expandido isentrópicamente en una turbina hacia una presión y una temperatura más bajas. El ciclo es completado de (4) a (1) enfriando el gas a presión constante.[3]

La eficiencia del ciclo ideal Brayton puede ser mejorada al usar una porción del calor rechazado durante el proceso de enfriamiento (4 a 1) para precalentar el gas antes de que entre al calentador. Otro método para mejorar la eficiencia es usar una compresión multietapa con enfriamiento interno. El PBMR utiliza ambos métodos, y el ciclo modificado en el cual el PBMR se basa está referido como el ciclo de recuperación de Brayton. Otra característica distintiva de este ciclo de recuperación es el uso de helio como fluido de trabajo.

El ciclo de operación de la planta PBMR se esquematiza en la Figura 3:

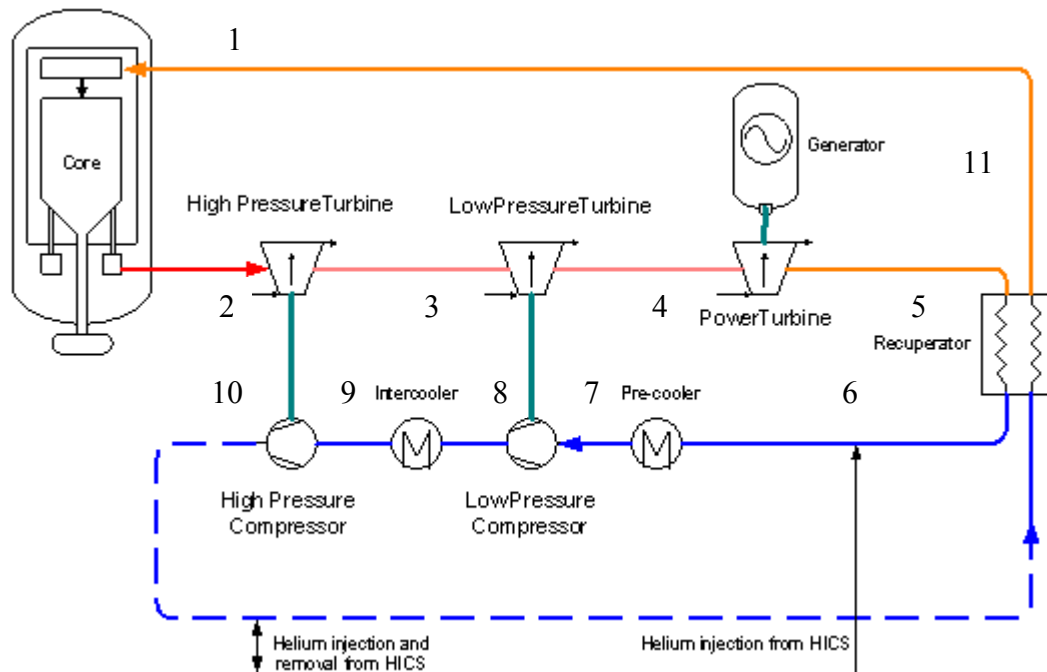


Figura 3. Ciclo de generación de energía del PBMR

1 a 2: El helio entra en el reactor a una temperatura de 500 °C aproximadamente y a una presión de 8.4 MPa y desciende entre las esferas calientes de combustible tomando el calor de ellas ya que han sido calentadas por la reacción nuclear. Posteriormente el helio sale del reactor a una temperatura de 900 °C aproximadamente.

2 a 3: El helio se expande en la turbina de alta presión. Esta turbina forma parte del turbo de alta presión y éste, a su vez, maneja el compresor de alta presión.

3 a 4: Enseguida el helio fluye a través de la turbina de baja presión la cual es parte de la unidad turbo de baja presión, la que a su vez maneja el compresor de baja presión.

4 a 5: El helio se expande en la turbina que acciona al generador.

5 a 6: En este punto el helio se mantiene a una alta temperatura. Fluye a través del lado primario del recuperador donde transfiere calor al gas de baja temperatura que va regresando al reactor.

6 a 7: El helio que pasa por el lado primario del recuperador es enfriado por medio de un pre-enfriador. Esto aumenta la densidad del helio y mejora la eficiencia del compresor.

7 a 8: El helio es comprimido por el compresor de baja presión.

8 a 9: El helio es enfriado. Este proceso aumenta la densidad y mejora la eficiencia del compresor.

9 a 10: El compresor a alta presión comprime el helio a 8.5 MPa.

10 a 11: El vapor frío y a alta presión de helio fluye a través del recuperador donde es pre-calentado antes de regresar al reactor.[4]

5. COMBUSTIBLE DEL PBMR

El combustible para este reactor está basado en el diseño alemán de alta calidad de esferas de grafito que contiene partículas de combustible forradas. Las partículas de combustible (kernels) consisten de dióxido de uranio. Cada kernel está forrado con una capa de carbón poroso, 2 capas de carbón pirolítico de alta densidad (una forma muy densa de carbón tratado con calor) y con una capa de carburo de silicio entre ellas. Las capas de carbón pirolítico y de carburo de silicio proporcionan una barrera impenetrable conteniendo al combustible y a los productos radiactivos que resulten de las reacciones nucleares.

Las partículas forradas están embebidas en una matriz de grafito formando una esfera de 50 mm llamada zona de combustible.

Agregando una zona gruesa de 5 mm de grafito (libre de combustible), se crea una esfera de combustible con un diámetro exterior de 60 mm (Figura 4). La zona de combustible contiene aproximadamente 15,000 partículas forradas, las cuales suman un total de 9 g de uranio. Un total de 456,000 esferas de combustible son requeridas para una carga completa.[5]

El uranio cubierto proporciona al PBMR uno de sus aspectos más importantes de seguridad. Esto significa que los productos radiactivos de fisión, que son producidos durante la operación del sistema, son confinados dentro de la partícula forrada durante todas las condiciones de operación y accidente. No hay liberación significativa de sustancias radiactivas o de contaminantes provenientes del combustible.



Figura 4. Esferas de combustible del PBMR

La seguridad de estos depósitos de productos de fisión radiactiva está dada por el diseño de los forros de las partículas de combustible. Por ejemplo, la capa de carburo de silicio es tan densa que ninguna cantidad radiológica significativa de gases o de productos de fisión es liberada de los elementos combustibles a temperaturas arriba de los 1,650 °C.

5.1 Operación del Combustible

Para tener una reacción en cadena, las esferas del PBMR contienen uranio enriquecido aproximadamente al 8 % en uranio 235. El U^{235} es el isótopo de uranio que soporta la reacción de fisión en el núcleo. El isótopo U^{235} ocurre en una concentración del 0.7 % de uranio natural.

El reactor está continuamente abastecido con combustible fresco o reutilizable desde la parte superior del reactor, mientras que el combustible ya agotado es removido desde abajo después de cada ciclo a través del reactor. Las esferas de combustible son medidas para determinar la cantidad de material fisionable que queda en ellas. Si la esfera aún contiene una cantidad reutilizable de material de fisión, esta es regresada a la parte superior del reactor para un ciclo futuro. Cada ciclo dura cerca de 3 meses.

Cuando una esfera de combustible ha alcanzado un consumo completo de 80,000 MWd/t de metal de uranio, es removida y enviada al almacén de combustible usado. Cada esfera de combustible pasa a través del reactor cerca de 10 veces y un reactor usará 10 o 15 cargas de combustible totales durante su vida de diseño. Una esfera de combustible durará 3 años aproximadamente.[6]

El alcance al cual el uranio enriquecido es usado para su agotamiento es más grande en el PBMR que en reactores convencionales. Además hay una cantidad muy reducida de material fisionable que puede ser extraído del combustible ya utilizado. Esto protege

al combustible del PBMR contra una posible proliferación nuclear o cualquier otro uso de conversión.

6. GENERACIÓN DE DESECHOS Y SU CONFINAMIENTO

Una planta nuclear produce menos desperdicios que una de combustibles fósiles que genere la misma cantidad de electricidad. Un kilogramo de uranio natural tiene la misma energía que 17 toneladas de carbón con un contenido de cenizas de desechos del 40%. Una planta grande de carbón usa 6 toneladas al día de este combustible, mientras que una planta nuclear de capacidad equivalente usa solamente un camión de carga al año.

El PBMR generará cerca de 19 toneladas de esferas de combustible agotadas por año, de las cuales menos de 1 tonelada es uranio. El combustible consumido es mucho más fácil de guardar que las barras de combustible de reactores de agua presurizada porque la capa de carburo de silicio alrededor de las partículas de combustible mantendrá la desintegración progresiva de los productos radiactivos, aislándola por millones de años. Esto es mucho más que la duración de la actividad de cualquier producto radiactivo incluyendo al plutonio.

El sistema del PBMR ha sido diseñado para tratar con los desperdicios nucleares y la seguridad. Habrá suficiente espacio para almacenar el combustible utilizado en tanques de almacenamiento secos dentro del edificio del PBMR. Todo el combustible consumido que generará el PBMR, durante sus 40 años de vida, será guardado ahí mismo. Después de que la planta haya sido cerrada, el combustible consumido será almacenado por otros 40 años antes de ser enviado a un depósito final.

En dicho depósito los desechos serán almacenados de una manera totalmente segura debido a que en primer lugar, los productos de la fisión están cubiertos con una capa de carburo de silicio. Esta capa forma una protección alrededor de dichos productos, lo cual previene que se contamine el medio ambiente. En segundo lugar, el combustible ha sido empacado en esferas de grafito el cual es un material inherentemente estable. Esto significa que las esferas no se romperán o desintegrarán y por lo tanto, la constitución del combustible de desecho no cambiará.[6]

7. CARACTERÍSTICAS DE SEGURIDAD DEL PBMR

El PBMR es representativo de una nueva generación de reactores nucleares avanzados. Estos reactores se caracterizan por sus propiedades inherentes de seguridad.

El diseño del PBMR es tal que no hay proceso físico capaz de causar un riesgo inducido de radiación fuera de su perímetro. El PBMR no requiere ningún sistema de seguridad tradicional como los utilizados en reactores antiguos que protegían contra fugas de radiación.

Algunas de las características que hacen del PBMR un diseño seguro son:

- Las partículas cubiertas en los elementos de combustible: las cubiertas de carburo de silicio que rodean a las partículas de uranio dentro de la esfera forma una vasija de presión en miniatura. Dicha vasija de presión provee una barrera de alta eficiencia que evita el escape de productos de fisión durante la operación.

La contención de radiactividad en la fuente, resulta en bajos niveles de contaminación en el circuito primario.

- El uso de grafito como material moderador y estructural dentro del reactor: el grafito usado en las esferas de combustible permanece estable a una temperatura máxima de 2,800 °C. Esto es más que el máximo de temperatura normal, 1,200 °C, durante la operación y la máxima temperatura, 1,600 °C, durante los eventos de enfriamiento.

Esto implica que la moderación dentro del reactor y la configuración de los elementos de combustible en el reactor no podrán cambiar bajo ninguna circunstancia.

- El uso de helio como refrigerante: el helio no cambiará de fase en ningún punto dentro del rango de operación del PBMR. Este es un aspecto adicional de seguridad. La reactividad del núcleo no se elevará debido a un cambio en el estado del refrigerante. La actuación termohidráulica del núcleo tampoco cambiará abruptamente en ningún punto de operación o durante un evento debido a un cambio de fase.

El helio es químicamente inerte y no reacciona con el grafito o con los componentes metálicos del núcleo.

- La baja densidad de energía del núcleo: el núcleo del PBMR tiene una baja densidad de energía en comparación con otros reactores nucleares. Esto, junto con la buena conductividad térmica del grafito, asegura que la temperatura del elemento del combustible no exceda los 1,600 °C incluso durante un enfriamiento forzado dentro del núcleo.
- Ha sido demostrado que las partículas de combustible pueden operar a 1,600 °C sin perder su capacidad como una barrera de alta eficiencia contra la liberación de productos de fisión.
- La alta inercia térmica del núcleo: la alta inercia térmica del núcleo asegura que cualquier transitorio de la temperatura es lento. La buena transferencia de calor del núcleo, asegura que la temperatura máxima que puede ser alcanzada en el núcleo no excederá 1,600 °C incluso durante un enfriamiento forzado dentro del mismo.

- El uso de un esquema continuo de realimentación de combustible: este esquema de operación asegura que nunca habrá un exceso de reactividad dentro del núcleo.[7]

8. VENTAJAS PRINCIPALES DEL PBMR

8.1 El Concepto Modular

El PBMR es una planta nuclear adaptable y flexible. Ha sido diseñada de forma modular, lo cual permite agregar módulos adicionales a la planta nuclear primaria de acuerdo con la demanda de energía.

El módulo PBMR es el componente más pequeño de un sistema de generación de energía de este tipo. El módulo es una planta generadora que puede producir 165 MW de energía eléctrica aproximadamente. Este módulo puede ser utilizado para generar energía trabajando él solo ó como parte de una planta nuclear que consista en 2, 4, 6 u 8 unidades.

El PBMR puede ser usado como planta eléctrica para satisfacer demanda de energía base o pico, es decir, puede seguir a la carga eléctrica en cualquier momento produciendo la cantidad específica de electricidad requerida por las comunidades que sirve.

Además, el reactor es mucho menos dependiente en cuanto a su localización que las plantas hidroeléctricas o que ocupan combustible fósil. Esto significa que el PBMR puede ser construido para servir las necesidades de energía de un área específica. El enfriamiento seco, aunque más caro, es una opción que puede brindar más libertad de localización.

8.2 Área de Construcción y Tiempo de Construcción Menores

El PBMR está basado en la filosofía que, en la nueva generación de reactores nucleares, estos deben ser pequeños con tiempos cortos de construcción de tal manera que la demanda y la oferta puedan coincidir en escalas de tiempo más cortas. Un solo módulo de PBMR producirá 170 MW (máximo), lo que es aproximadamente el 10% de la entrega de una planta convencional nuclear o de combustibles fósiles. Esta filosofía hace posible construir plantas nucleares que satisfagan las necesidades de una comunidad local y permita la expansión de la planta conforme la demanda crezca.

La construcción principal de un módulo cubrirá un área de 2,124 m² (aproximadamente 59 X 36 m), Figura 5, lo que significa que 4 módulos ocuparían una extensión equivalente a una cancha de fútbol soccer. La altura del edificio será de 57 m, de la cual la mitad estará bajo el nivel de tierra.[8]

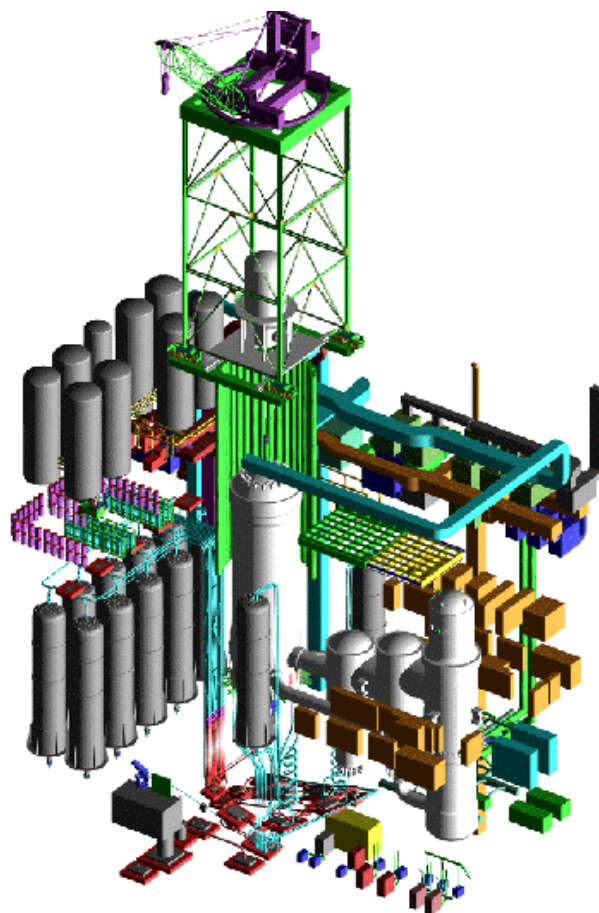


Figura 5. Proyección tridimensional de las instalaciones PBMR

8.3 Eficiencia en Costos

Se estima que el costo de generación del PBMR se encontrará muy por debajo del costo promedio en el mundo de 3.4c US/kWh.[9] Los costos de almacenamiento a largo plazo de desperdicios radiactivos están incluidos en estos estimados.

El PBMR es relativamente barato de construir en comparación al costo de construcción de otros generadores de energía. El costo estimado es de US\$ 1,300,000 por MWe de capacidad instalada, comparado con US\$ 900,000 por MWe para una planta de carbón en Sudáfrica.[10] Esta diferencia en precios es compensada a largo plazo por el costo de producción y transportación de carbón de la mina a la planta de energía térmica.

8.4 Reducción de Gases de Invernadero.

El PBMR proveerá una estrategia económica de mitigación para las reducciones de gases de invernadero ya que la generación de energía nuclear no produce emisiones de dióxido de carbono, humo o cualquier otro gas.

9. ESPECIFICACIONES DEL PBMR [11]

Energía máxima de entrega (a una temperatura de 28°C para el agua de enfriamiento) Esta es la máxima energía eléctrica que la planta será capaz de generar.	170 MW
Rango estable y continuo de energía	0-100%
Tasa de subida (100% - 40% - 100%) Esta es la tasa máxima a la cual la salida de potencia de la planta puede seguir a la carga conectada.	10%/min
Rechazo de carga sin fallo Esta es la potencia máxima de salida a la cual la una perdida de carga puede ocurrir sin causar una crisis en la planta.	100%
Costo capital de la planta por kWe instalado	US\$ 1,000 a 1,300/kWe
Tiempo de construcción Este es el tiempo de construcción requerido para la construcción de un módulo.	24 meses
Revisiones generales planeadas Tasa planeada 2.5% y tasa forzada 2.5% Este el porcentaje de tiempo a lo largo de la vida útil de la planta que se planea será destinado para llevar a cabo acciones de mantenimiento.	30 y 50 días por 6 años
Gastos generales, mantenimiento y costos de combustible	US\$ 10 a 11/MWh
Zona destinada de emergencia Esta es el área alrededor de la planta que debe ser evacuada en el evento posible de un accidente grave.	400 m
Tiempo de operación de la planta	40 años

10. CONCLUSIONES

Dadas las condiciones energéticas mundiales y el cambio climático que afecta al planeta, es imperativo, tanto para las naciones como para la comunidad científica internacional, buscar nuevas opciones tecnológicas que permitan hacer frente a estos eventos.

El Reactor Modular de Cama de Esferas (PBMR) es una tecnología innovadora cuyas características técnicas de operación y de seguridad inherente podrían hacer de ella una opción viable para hacer frente a los retos que presentan los eventos mencionados.

Sin duda alguna será de gran importancia seguir de cerca la evolución de esta tecnología en los años por venir.

AGRADECIMIENTOS

La información proporcionada por Helen Oosthuizen sobre el PBMR ha sido de gran ayuda para la elaboración de este trabajo.

REFERENCIAS

1. "Comisión Federal de Electricidad" <http://www.cfe.gob.mx> (2002).
2. PBMR Pty Ltd, "Introduction to the Pebble Bed Modular Reactor (PBMR)" Document No.: 009949-185, Revision: 1, p. 12-13 (2001).
3. Wark, Kenneth, *Termodinámica*, McGraw-Hill, México, México (1984)
4. PBMR Pty Ltd, "Introduction to the Pebble Bed Modular Reactor (PBMR)" Document No.: 009949-185, Revision: 1, p. 44-47 (2001).
5. "PBMR" <http://www.pbmr.co.za> (2003).
6. PBMR Pty Ltd, "Report on the Commercialisation of the Pebble Bed Modular Reactor", p. 27-28 (2001).
7. PBMR Pty Ltd, "Introduction to the Pebble Bed Modular Reactor (PBMR)" Document No.: 009949-185, Revision: 1, p. 70-72 (2001).
8. "PBMR" <http://www.pbmr.co.za> (2003).
9. "PBMR" <http://www.pbmr.co.za> (2003).
10. "Eskom" <http://www.eskom.co.za> (2003).
11. "PBMR" <http://www.pbmr.co.za> (2003).